

# 氮循环的失控 ——一个全球性问题



与地球上的水一样，氮化合物在空气、水系统和土壤中循环。但与水不同的是，这些化合物越来越多地被释放到环境中。也就是说，全球的氮循环系统正在改变，它可能会对生物多样性、全球气候变暖、水质、人类健康，甚至发展中国家的人口增长率产生严

重的影响。

在氮环绕着的世界中，你也许会认为，总有大量的氮在循环流动，多一点也无妨。但是，已被固定的活性氮或从非活性氮气形式转变过来的活性氮，其数量决定了植物成长等生命的基础，而这些生命活动的基础又在相当程度上

决定了全球食物供应的动力。人类在二十世纪，或有意识地通过化肥的生产，或无意识地通过矿物燃料的燃烧副产物，产生出越来越多的活性氮。

尽管二氧化碳可能受到更多的关注，新罕布什尔大学负责研究和公共事务的副校长 John

Aber还是认为，“与其它任何一种基本元素的循环相比，氮循环改变得更多”。他说，人类正在将越来越多的活性氮添加到全球氮循环中，这种人为的来源超过了所有其它来源的总和。然而，活性氮也有其积极的一面。研究者们如弗吉尼亚大学环境学教授 James Galloway 说，氮肥的利用对于解决全球的温饱起到了关键的作用。问题是在于我们应如何慎重地管理氮。

#### 氮的自然历史

一切生命都需要氮元素。但是大部分的氮原子都紧密结合成对作为氮气而存在，氮占大气 78% 的总体积。大多数的有机体不能打破氮气分子两个原子间的强有力的三键。对于动植物的生长来说，它们需要固定形式的活性氮元素；这种氮元素与碳、氢或氧结合，最常见的

是有机氮化合物（如氨基酸）、铵 ( $\text{NH}_4^+$ ) 或硝酸盐类 ( $\text{NO}_3^-$ )。动物通过摄入植物和食物链上的其它动物来获得活性氮，而植物则从土壤或水中获得。

闪电是一些自然的活性氮产生的原因。在世界范围内，据估计每年闪电会产生固氮 3 – 10 太克 (Tg)。太克是通常讨论氮循环的计量单位。闪电产生的能量将氧和氮转变为氧化氮 (NO)，然后氧化成二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )，之后转变成硝酸 ( $\text{HNO}_3$ )。 $\text{HNO}_3$  可通过雨、雪、冰雹或其它大气沉降物带到地面。这种来源的活性氮对于缺乏固氮植物的地区是尤为重要的。

大多数自然产生的活性氮来自细菌的固氮过程，包括藻青菌和某些特定的细菌（如 *Rhizobium* 属），这些细菌常常在像豌豆、蚕豆和苜蓿等植物上共生存在。据 2003 年 4 月

Galloway 和他的同事们发表在《生物科学》(BioScience) 上的文献综述，专家们相信，自然情况下地球陆地表面非农业有机体每年产生固氮 100 – 300 Tg，虽然大多数的估计偏低。

农民们最终学会利用固氮细菌共生的植物来增加土壤中活性氮水平，但这种资源很有限：二十世纪初他们轮种固氮作物（比如豆科植物）或添加天然生成的肥料（例如粪肥、鸟粪和在智利开采的硝酸矿物沉积物）。依据《生物科学》综述，那个时候人类每年生产的活性氮大约为 15 Tg。

然而，差不多在同一时候，德国科学家 Fritz Haber 和 Carl Bosch 研究成功将非活性大气氮转变成氨的方法，氨是构成氮肥基础的活性化合物。目前，全球每年采用 Haber-Bosch 方法生产大约 100 Tg 的活性氮，其中大部分用于生产氮肥。在 1997 年 7 月《科学美国》(Scientific American) 杂志上，Manitoba 大学地理学教授 Vaclav Smil 估计氮肥滋养生产的食物养育了大约 20 亿的人口。

根据《生态与环境前沿》(Frontiers in Ecology and the Environment) 2003 年 5 期 1 卷中科罗拉多大学生态与进化生物学助理教授 Alan Townsend 及其同事关于全球氮循环与人类健康关系的报告所载，过去 15 年人类生产和注入环境中的活性氮数量呈爆炸性增长。Galloway 和同事们在《生物科学》综述中写道，目前人类每年大约生产 170 Tg 的活性氮，全球每年的氮肥使用约增加 15 Tg。Galloway 说，人类生产与天然存在的活性氮的比值可能会随着人口的增长而进一步增加。要喂养更多的人口，不仅需要向土地施更多的活性氮肥，还需要在更多未受破坏的土地上种植固氮作物，使其成为耕地。

#### 人类活性氮的来源

这些人类产生的活性氮来自哪里？最大的来源就是氮肥。据《生物科学》的综述，自 2000 年以来，全球每年大约 100 Tg 的活性氮释放自农田上所施的氮肥。Townsend 和同事们在其《生态与环境前沿》的论文中指出，现代耕作方法已越来越多地被采纳，因此固氮的比率也随之增加，在发展中国家这种趋势尤其显著。Galloway 和同事们写道，固氮作物（比如豆科作物）的普遍耕种，已额外添加了大约 40 Tg 的活性氮。



**供给饥饿世界的食物：**利用氮肥生长的食品喂养了世界上大约 20 亿的人口。包括亚洲在内的地区正越来越依赖这种对环境有害的肥料。

生物质的焚烧，如木材作为燃料的利用和退林还耕，又增添了大约 40Tg 的氮。湿地的干涸氧化了土壤中的有机材料，将蔬菜地用来种植农作物则可以从土壤中释放出活性氮。根据斯坦福大学人口与资源研究教授 Peter Vitousek 为首的小组在《生态学焦点》(Issues in Ecology) 1997 年春天发表的一篇文章，这些来源分别提供约 10 和 20 Tg 的氮。

矿物燃料的燃烧也增加了活性氮的量。“不单是农业生产改变了氮循环，”北卡罗来纳大学 Wilmington 分校海洋科学中心的教授 Michael Mallin 说，“城市化也大规模地改变了氮循环。车辆遍及城市，车辆释放氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ :  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  的共同名称)。氮氧化物进入大气后沉降，产生了新的问题。”由大气中的固氮燃烧后释放出活性氮（否则会无限期地储存在燃料中），全球每年矿物燃料燃烧产生约 20 Tg 的活性氮。

明尼苏达大学生态学教授 David Tilman 认为，现在地球上无本地区活性氮污染的地方极少。他说：“全球的农业都在扩张，每公顷的施肥率（每公顷添加的氮），在不同地区差别不大。不仅在七、八个最工业化的国家，甚至在那些非工业巨头的国家中，农业部门也非常推崇氮肥。”Galloway 补充道，氮污染不仅通过风



**风暴之美：**闪电固定了地球上自然存在活性氮的一部分，这对于几乎没有氮固定植物地区的土壤是很重要的。

和水扩散至全球，还通过船只和货运汽车。他认为：“跨国商业行为是输送活性氮到全世界的一种主要方式。”

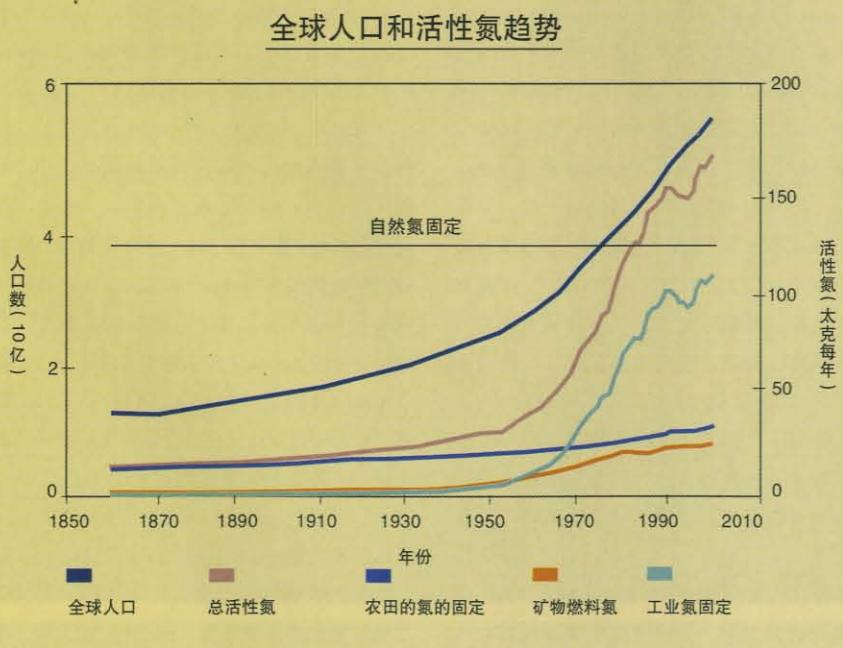
其结果是，Galloway 说，地球上的任何角落，除了落后的非洲的大部分地区，都存在相当数量的活性氮污染的来源。尽管非洲大部分

地区免于遭受许多直接的氮污染，但同时也丧失了极其需要的肥料。Galloway 说，目前亚洲、欧洲和北美洲占了几乎 90% 的来源于人类的活性氮污染。长久以来，欧洲国家像荷兰（氮肥的长期使用和许多集中的动物牧场可能已使其成为世界上氮最饱和的地区）和德国已经出现氮污染的效应。比如在荷兰，极高的活性氮水平已使荷兰农村的灌木地变为草地。Galloway 说，但在接下来的 50 年里，发展中国家对氮肥的依赖与日俱增，人口密度的增加以及汽油机动车的使用，都可能会增加氮相关的环境和人类健康的风险。

#### 恶性循环？

“氮循环在全球已经达到了令人瞩目的程度，但不同地区的差异很大，”Townsend 说，“主要的热点地区是世界上所有的工业化国家。现在我们目睹了美国、欧洲和亚洲的大部分地区以及中国活性氮使用和生产所导致的污染在惊人地增长。例如，有些地区的大气沉降物是有人类活动之前的十倍或更多。”

Townsend 说，当然，一部分的活性氮会发挥有益的作用。氮肥在减少世界上许多地方的饥饿和营养不良功不可抹，特别是过去十年在亚洲。事实上，Smil 在瑞典杂志 Ambio 2002 年 3 月刊上写道“（氮）肥的使用将世界人口最多



国家的至少三分之一的人摆脱了营养不良，享有足够的食物”。

Townsend 说，由于氮水平的持续增长，它对健康的负效应也开始增加。此外，Galloway 说，不仅活性氮可以影响许多不同的生态系统，它的单一原子也可以反复造成危害，这和大多数相对容易辨认的污染物不同。“如果你将来自矿物燃料燃烧的氮氧化物分子放在大气中，或者将铵分子放在一块农田上作为肥料，”他解释道，“就会发生从大气酸雨到颗粒物形成的一套完整的连锁效应，从而降低大气能见度、对人类健康产生不良影响、造成酸雨以及土壤和溪流的酸化、海岸富营养化、生物多样性减少、地下水卫生问题、一氧化二氮 ( $N_2O$ ) 释放到大气中，进而影响温室效应和平流层的臭氧。”

#### 大气中的氮

活性氮对臭氧的破坏效应很大，在大气层的每个高度都会造成破坏。Aber 说：“像美国东北部的地区，因为汽车众多，所生产的影响大于农业活动的影响，所以加入全球氮循环的是氮的氧化形式。”来源于氮肥的使用、生物质的燃烧和矿物燃料燃烧的氮氧化物，是烟雾和地面臭氧形成的一个重要促成因素。Aber 说：“那是（美国东北部）大气污染的最重要形式。”

高浓度的  $NO_x$ ，在车辆拥有率很高的城市地区很普遍，它可以产生低空分布的臭氧，这些臭氧会导致或加重哮喘、咳嗽、刺激性呼吸道疾病、呼吸道炎症和慢性呼吸系统疾病。 $NO_x$  的高浓度水平也会加重病毒性感染，比如常见的感冒。除了地面来源之外，土壤的脱氮过程（活性氮转变为  $N_2$ ）也产生一些  $N_2O$ ，飞机会将  $NO_x$  直接排入大气。

在大气层的中等高度， $N_2O$  充当一个温室气体，每个分子吸收的辐射量约为二氧化碳的 200 倍。尽管在低空，活性氮会增加臭氧的浓度，但事实上在高空它会破坏臭氧。在平流层，紫外光分离  $N_2O$ ，产生  $NO$ ，而  $NO$  可作为催化剂打破臭氧分子。平流层内的臭氧破坏会使更多



**一件好事出了偏差：** 氮肥使世界上的大部分人口摆脱了营养不良，享有足够的食物。但大气、水和土壤中的过量活性氮化合物对脆弱的生态系统造成极大的破坏。

的紫外辐射到达地球表面，从而导致更多的人患皮肤癌。Rajaram P. Kane 是巴西国家太空研究署的一位资深科学家，他在《国际气候学杂志》(International Journal of Climatology)1998 年 3 月 30 日的一篇文章中说，臭氧的减少暗示了紫外线 B 的辐射增加 10~20%，这可以“解释为什么从 1970 年代开始皮肤癌患者增加了 20~40%”。

康奈尔大学生态与环境生物学教授 Robert Howarth 说， $N_2O$  的效应可以持续数十年，并在大气层中滞留 120 年。“在促成平流层臭氧破坏的过程中，它起到了很大的作用，”他解释道，“它是一种温室气体，是一种相当强有力的温室气体，它是大气层中存在最长久的温室气体。”一旦存在于大气中，其它含氮气体（比如  $NO_x$  和氨）就可以产生足够小的细小颗粒物，它能扩散进入人肺的深部，从而导致心血管疾病、呼吸系统疾病、哮喘、肺功能障碍以及死亡。

尽管这些效应很严重，Howarth 说，但公众对于氮对公共卫生、全球气温变暖以及其它种种的作用知之甚少。“每个人都充分认识到地

表大气中的臭氧是一个重大的健康问题，”他说，“可一般人并不知道臭氧污染是由氮污染引起的。如果没有氮污染，就不会有臭氧污染。”其他氮污染的间接健康效应还包括为霍乱发生创造条件、以及促进携带西尼罗河病毒、疟疾和脑炎病毒的蚊子的繁殖。

其它专家们指出，至少在美国决策层，缺乏对活性氮在酸雨产生过程中作用的认识。Aber 说，不是所有的  $NO_x$  都留在高空。他说：“在大气层接触到湿气后， $NO_x$  转变为硝酸，这就是酸雨中的氮成分”。纽约 Millbrook 生态系统研究所所长 Gene Likens 说，在美国的工业区，硝酸已经开始成为酸雨中越来越重要的成分。“我们在 Hubbard Brook 实验林区进行的长期研究是世界上对降水量和溪流化学性质持续时间最长的测量研究，其结果清楚地显示变化正在发生”他说。他还说，当 1963 年研究开始时，硫酸占到雨水总酸度的大约 70%，硝酸大约 15%；而目前硫酸约占 50%，硝酸大约 40%。“我们预计如果这种趋势延续下去，到大约 2012 年，在东部的北美洲，硝酸将成为主导性的酸的来源，”

Likens说，“但目前我们所有的管理措施仍侧重于减少硫的排放。”

#### 水中的氮

如果氮污染的哪个方面具有高度的公共和政策方面的意义，那就是水域过量营养物引起的效果，特别是沿海地区。“由于高度可溶性，硝酸盐类迅速进入农田或林区根部地带以下，并进入地下水，”马里兰大学环境科学中心主任、海洋学教授 Donald Boesch 说，“要对其加以控制很困难而且费用昂贵。”

来自动物养殖设备、肥料生产、腐败物系统或者其它来源的活性氮，增加了大多数工业化国家水体中的硝酸盐类浓度。在挪威，不到十年里 1000 条湖泊硝酸盐类浓度增加了一倍。美国东北部和大部分欧洲的河流在过去的 100 年里增加了 10 到 15 倍。

在海湾和沿海地带硝酸盐类增加的地方（河流受到的影响较小），氮污染可以提供一个稳定的营养物来源，使藻类的茂密生长无法控制。藻类死亡后下沉腐败，消耗水中氧气。如果氧气被消耗太多，水体会成为“死亡带”，成为一个不能再支持带鳍水生动物、有壳水生动

物或者其它更多的水生生命成长的地区。也许最有名的死亡带是在墨西哥湾发现的，墨西哥湾由富硝酸盐类的密西西比河注入，死亡带大小在 3000 到 8000 平方英里间波动。氧匮乏地区也出现在波罗的海、亚得里亚海、泰国海湾、黄海以及美国的 Chesapeake 海湾。

Boesch 指出，早在 1987 年科学家们就认为 40% 进入这个循环系统的氮需要被转移出去。但是至今，减少 Chesapeake 海湾活性氮的方案并没有明显改进海湾的卫生状况。尽管一般说来河流对藻类繁盛和氧的缺失不敏感，Mallin 发现北卡罗来纳州黑水流域的溪流中（称之为黑水是因为它富含有机物）也存在类似的现象。他说：“不管我们添加了什么（硝酸盐类、氨或家畜的尿素），在这些黑水流域都将会激发藻类的生长。”

活性氮也会渗入饮用水，氮肥的硝酸盐类和家畜的排泄物以各种方式进入溪流、河流、湖泊和地下水。Townsend 说，在美国，多达 20% 的地下水源头可能超过美国和世界卫生组织硝酸盐类浓度 10 ppm 的限值。世界上其它许多地方也超过了这个规定浓度。高浓度的硝酸盐类会导致婴儿高铁血红蛋白症——也称

“婴儿青紫疾病”。患该病时，硝酸盐离子削弱了血红细胞的携氧能力。流行病学研究也把硝酸盐类与生殖问题和某些肿瘤联系起来，发现在浓度高于 10 ppm 时，患膀胱和卵巢肿瘤的危险性也会增加。

#### 土壤中的氮

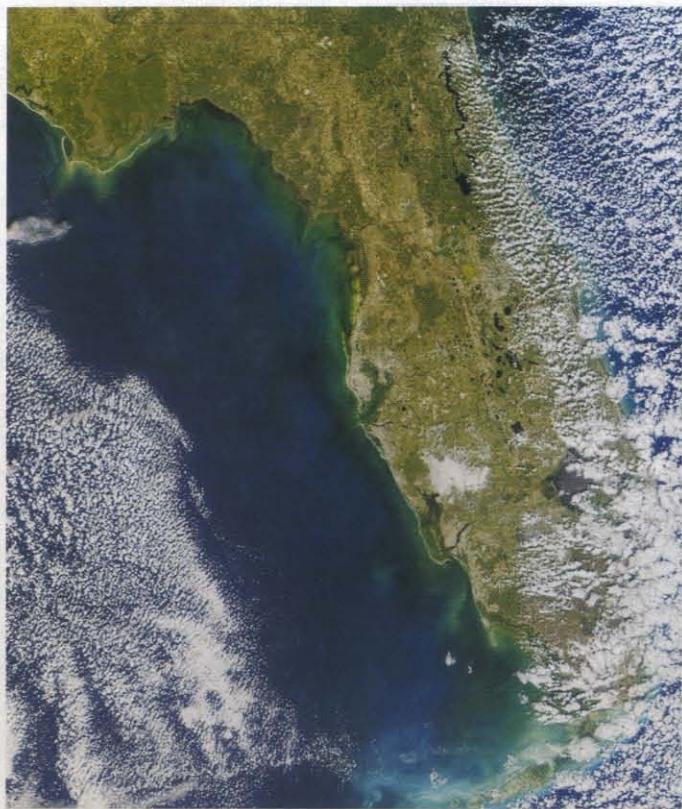
与水和空气一样，活性氮在土壤中也可以积累。然而，植物吸收氮的数量是有限的。当土壤不能再吸收更多氮的时候，被称之为“饱和”。饱和的土壤会让过量的氮流出，至少从理论上说是如此。但是过量的氮不会独自离开。“当它滤出系统，” Townsend 说，“它会携带其它营养物，最终造成土壤的酸化，它还携带像镁和钙一类物质进入水中。最后形成一个非常失衡的系统。”

Howarth 说，如果饱和土壤立即排出多余氮，而不是使之脱氮，则对不久的将来是个坏消息，因为未来所有的多余氮将直接流入地下水、河流、溪流和海洋。不过，他说，我们对实际将发生的事情了解得很少。“如果氮会在土壤中累积，那么在土壤贮存氮的能力达到饱和之前，这种积累可能只是暂时的现象。随后



高浓度 NO<sub>x</sub> 的来源：生物质的燃烧都产生 NO<sub>x</sub>，它是颗粒物和地面大气臭氧形成的重要因素。





**潮流正在上涨：**氮肥有助于水藻生长，例如 2001 年的红潮，使水藻沿着佛罗里达海湾的海岸线繁殖超过了 100 英里，如此密集的繁殖杀死了成千上万的鱼类，并威胁到人类健康。

“我们会面临更大的问题，”他说。“另一方面，如果它被脱氮，那是一个更加稳定的进程，并且可能会持续下去。”

Townsend 说，一些科学家曾希望多余活性氮水平会通过刺激可吸收二氧化碳植物的生长来减少温室气体。但是，他说，“看起来这不可能起到主导作用。”尽管大家尚未形成共识，Tilman 补充说，“尚无充分的证据表明氮沉积确实会导致碳转移和储存的增加。”

尽管更多的活性氮意味着更多的生长，它同时也改变了哪些物种在生态系统中可以茁壮成长的自然规律。Tilman 说，例如，在富含氮的草原，“物种的种类转到了那些树叶可以很快降解的植物上。正因为它降解得更快，氮的增加事实上并没有增加炭元素的净贮存量。”

表面上看起来，额外增加的营养似乎至少可以帮助处在挣扎状态的生态系统恢复生机。而事实上，活性氮会破坏生态系统脆弱的平衡。“从十九世纪 50 年代开始，我们已经意识到地球生态系统中营养物质的增加会引起那里的物种改变，并导致

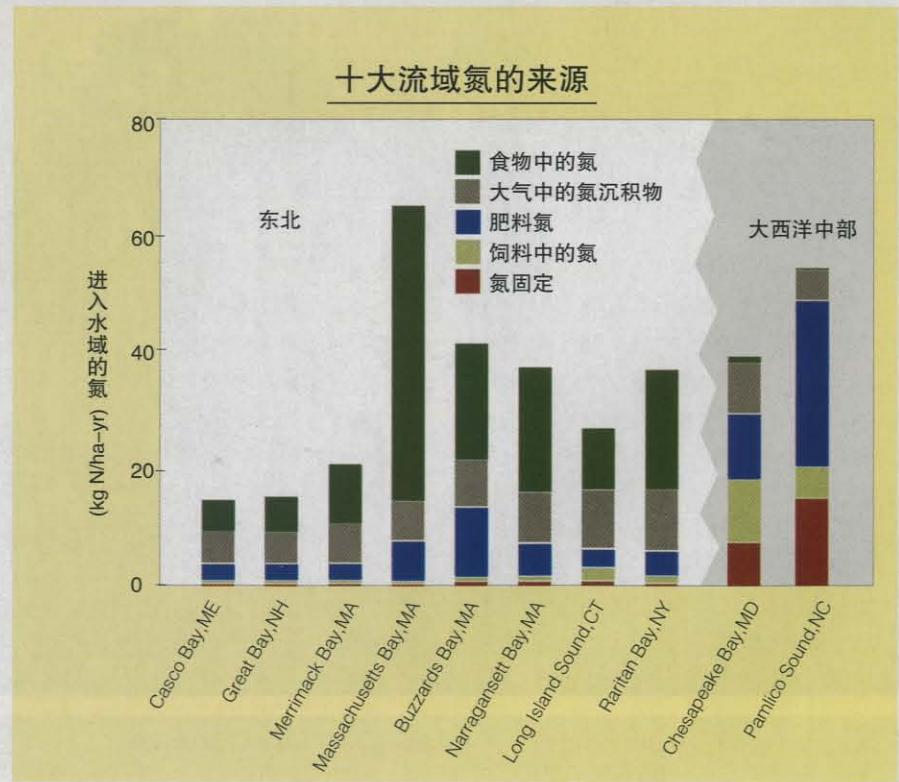
生态系统多样性的损失，”Tilman 说。“我们已经看到了由于农业耕作对氮的影响最大，而且产生了巨大的效应（生物多样性的丧失）。”《科学》杂志(Science)2004 年 3 月 19 日发表了 Open 大学地球科学家 Carly J. Stevens 和同事们的报告，他们最近在英国的现场研究已经证实，在 68 个草原的样本上，随着氮自然沉降的增加，生物多样性在减少。Tilman 说，他将氮添加到生态系统的实验工作也显示了类似的结果。

#### 重掌控制权

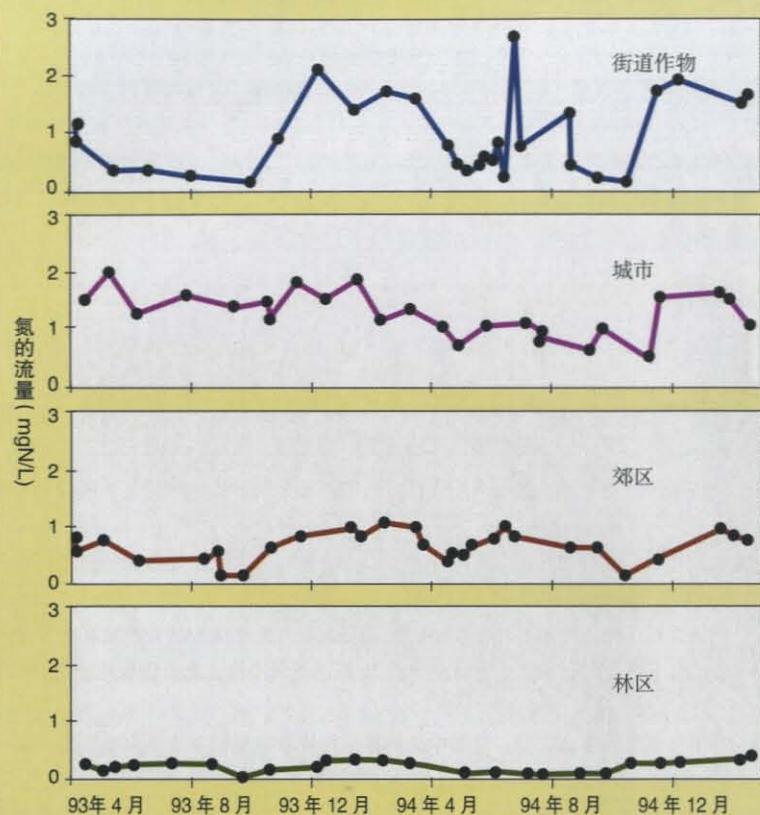
Galloway 说，减少进入到环境中的活性氮的数量是关键。用于保证粮食产量的氮肥，最终只有大约 2 – 10% 进入人体，其比例取决于不同地区的差异。剩下的氮进入环境中，他说，“除非产生脱氮并使其返回到 N<sub>2</sub> 分子，不然就意味着活性氮在环境中、大气层中、地下水里、土壤中、生物区里累积增加。”

有些解决办法必需长期实施才能达到最佳效果，否则便毫无用处。Townsend 说，如果世界上众多的食肉者转变为素食者，农民可以大大减少依赖氮肥生长的谷类种植，因为大多数谷类被用于喂养动物和变成甜味剂。但是在美国和亚洲，肉的消费是在增加，而不是减少。已有人提出，有朝一日或许可以用转基因工程处理共生菌的技术，直接赋予谷物固氮能力。

斯坦福大学地球科学教授 Pamela Matson 说，一个更实用、低技术难度、低成本的解决方法是改进农民轮种作物和土地施肥的方法。例如在美国中西部，农民秋天施肥是很常见的。冬天的积雪在春天解冻时冲刷掉的肥料的数量远远超过留在土壤中的数量。她说，在那些天气无法预测的地区，许多农民都故意过量施肥，而不会去冒因缺乏肥料而无丰收的风险。Matson 说，可供选择的方法是在需要的时候添加恰当的数量。一些农民恰



## 土地的使用和氮的流量



饱和点：专家警告说氮饱和土壤可能不再吸收环境中过量的氮。

当地使用了这种方法。

为了更好地理解氮循环的改变并减少其负面影响，以瑞典为基地的“国际地球和生物规划”和以法国为基地的“环境问题科学委员会”已经联合支持国际氮倡议（International Nitrogen Initiative, INI）。这个国际工程计划分三个阶段：评估氮及对由此产生问题的认识；制订区域策略；建立地区研究中心以实施各项目标。INI 将会资助第三次国际氮素大会于 2004 年 10 月 12 – 16 日在中国南京举行。科学家们将会集中讨论亚洲特有的问题，评估既能减少氮污染又能增加食品和能量产量的可行方案。在这次会议上，INI 科学咨询委员会将为亚洲规划一个或更多的地区性研究中心。（为期 5 天的第三次国际氮素大会已在南京落下帷幕，来自 40 多个国家和地区的近 400 名与会科学家共同发表了《氮素管理南京宣言》，并将其递交给联合国环

境规划署（UNEP）的代表。来自世界各国的代表一致希望以《氮素管理南京宣言》为契机，争取尽快形成一个有关氮素管理的政府间国际公约。编者注）。

Likens 说，当然最终的解决办法是要像管理其它污染物一样管理氮。Galloway 说，在欧洲，管理规章已经有助于减少氮污染。但在美国（更不要说那些发展中国家），尚有很长的路要走：不光要制定规章制度，还要了解氮循环的规律。

他列举了联邦制定的养猪场减少氮损失规章制度的例子。“强制建造一个放置废弃物的污泥塘以减少排入水源的活性氮。废弃物被贮存在这些大污泥塘中，然后暴露于空气中（向大气层中释放氨），随后将烂泥播撒到种植作物的土地上，”他解释道。在有效地使氮不释放入河流这一点上，这个系统奏效了。“但是它只

是使氮转移到大气层中，” Galloway 说。“所以你需要有一个综合的管理政策。”

Galloway 说，我们知道全球氮循环系统正在遭到破坏。“我们所未曾了解的是氮蓄积的速率。而且因为活性氮是当前多种环境问题的促成因素，所以活性氮越多，蓄积率就越快，它的效应及其分布也将越来越大。”

“人类正在全球性地改变氮循环，其速度超过任何一种主要的生化循环。这种状况愈演愈烈，” Townsend 说。“其中所产生的问题之多、范围之广，我们真是应该采取行动了。令人欣慰的是，从各方面预计，我们能够做到在采取相应措施进行治理的同时，避免对社会经济系统产生重大影响。”

-Scott Fields

译自 EHP 112:A556–A563 (2004)